

# Kapitel 5

## Zusammenfassung und Perspektiven

*“[...] Wir haben Leute, die Musikstücke komponieren, Leute, die Dramen und Poesie schreiben, und eben Leute, die Experimente zu den Grundlagen der Quantenphysik durchführen. Offenbar ist es Teil unserer Identität als Mensch, als Mitglied der Spezies Homo sapiens, solch Dinge zu machen. Dazu gehört offenbar auch die Neugier, die reine Neugier, die durch keine praktische Anwendung motiviert sein muss”  
(Zeilinger; Einsteins Schleier)*

Als wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit liegen folgende Materialien vor:

- Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik in der Sekundarstufe II aus einer epistemologischen Perspektive.
- Ein Beitrag zur Betrachtung des Mach-Zehnder-Interferometers (mit normaler und reduzierter Lichtintensität) im schulischen Kontext.
- Die Leitlinie zur Entwicklung eines Konstruktes – des konzeptuellen Profils – zur Erfassung der Schülervorstellungen über Quantenentitäten aus einer phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Perspektive.
- Instrumente (Fragebogen) zur Erfassung der Schülervorstellungen über Photonen aus einer phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Perspektive.

### 5.1 Das Unterrichtskonzept

Das Unterrichtskonzept “Der Epistemologische Vektor am Beispiel der Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer” wurde auf der Grundlage der Epistemologie

Bachelards entwickelt und stützt sich auf fachwissenschaftliche und fachdidaktische Literatur.

Die philosophische Auffassung Gaston Bachelards erscheint – im Gegensatz beispielsweise zu dem Werk von Thomas Kuhn – im deutschsprachigen Raum selten in didaktischen Zusammenhängen. Offensichtlich wird die Fruchtbarkeit seiner Epistemologie für didaktische Belange unterschätzt, und es ist daher gerechtfertigt, die Epistemologie Bachelards als interessanten didaktischen Aspekt in Forschung und Entwicklung zu betrachten.

Ein besonderer Grund für die Berücksichtigung der Epistemologie Bachelards in dem vorliegenden didaktischen Kontext liegt darin, dass Bachelard sich in seinen epistemologischen Ansätzen intensiv mit der Überwindung der klassischen Physik durch die Quantenphysik befasst hat. In diesem Zusammenhang entwickelte Bachelard den Begriff des “epistemologischen Vektors”, der zur Abstufung von philosophischen Positionen im wissenschaftlichen Entwicklungsprozess und damit zum Entwurf eines “epistemologischen Profils” bezüglich eines wissenschaftlichen Konzepts dient. Daher stellt der Begriff des “epistemologischen Vektors” der wesentliche Aspekt der Epistemologie Bachelards für unsere didaktischen Reflexionen über die Lehr-Lernprozesse in der Quantenphysik dar. In Anlehnung an die im konzeptuellen Profil Bachelards abgestuften philosophischen Positionen standen vier epistemologische Unterrichtsfelder, durch die ein physikalisches Phänomen mit vorgezeichneter Abstraktionszunahme im Unterricht betrachtet wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der inhaltliche Schwerpunkt der epistemologischen Unterrichtsfelder in der Betrachtung des Mach-Zehnder-Interferometers für normale und reduzierte Lichtintensität. Im Verlauf der Unterrichtsfelder wird ein idealisiertes Mach-Zehnder-Interferometer für einzelne Photonen “konstruiert”, mit dessen Hilfe das Verhalten von Photonen im Hinblick auf das Teilchenbild und das Wellenbild im Unterricht betrachtet wird.

Als didaktisches Konstrukt sind allerdings die epistemologischen Unterrichtsfelder kontextübertragbar, so dass auf der Basis der epistemologischen Unterrichtsfelder weitere Unterrichtsvorschläge entwickelt werden können.

## 5.2 Das Mach-Zehnder-Interferometer

Mit Hilfe von Experimenten, die prinzipiell nach der experimentellen Anordnung eines Mach-Zehnder-Interferometers aufgebaut werden, wird in aktuellen Gebieten der modernen Physik intensiv geforscht – wie beispielsweise über Quantencomputer und im Bereich der Informationsübertragung – und es werden neue Tests zu den Grundlagen der Quantentheorie durchgeführt, die früher nur mit Hilfe von Gedankenexperimenten

durchdacht werden konnten.

Daher hat in den letzten Jahren das Mach-Zehnder-Interferometer für Quantenobjekte auch in schulischen Kontexten viel Aufmerksamkeit erregt. Neben seiner Funktion bei der Betrachtung grundlegender und philosophischer Fragen der Quantentheorie ermöglicht es

[...] mit den Schülerinnen und Schülern Aspekte aktueller Forschung tief zu durchdenken. Das dadurch ermöglichte "Gefühl des aktuellen Dabeiseins" kann zur Motivation wesentlich beitragen. [Gehrmann et al. 1999]

Davon abgesehen bietet das Mach-Zehnder-Interferometer bereits zahlreiche Möglichkeiten zu didaktischen Anwendungen im Physikunterricht. Einige didaktische Vorschläge, in denen das Mach-Zehnder-Interferometer eine wichtige Rolle spielt, wurden im Kapitel 3 dieser Arbeit präsentiert und kommentiert. In dieser Zusammenstellung unterscheidet sich allerdings unser Unterrichtskonzept bezüglich der Anwendung des Interferometers wesentlich von den anderen Unterrichtsvorschlägen, denn wie im Verlauf dieser Arbeit mehrfach betont wurde, besitzen der Aufbau, die Justierung und der Idealisierungsprozess des Mach-Zehnder-Interferometers wichtige didaktische Funktionen in unserem Unterrichtskonzept. Die Konstruktion des Mach-Zehnder-Interferometers für Photonen mit zunehmender Abstraktion in den epistemologischen Unterrichtsfeldern ermöglicht, dass sich die Schüler mit Überlegungen zur Umwandlung des realen Interferometers in das ideale Interferometer und weiterhin mit der Umwandlung des idealen Interferometers zum Interferometer für einzelne Photonen auseinandersetzen und daher, einen gewissen Realitätscharakter den "Beobachtungen" im Interferometer für Photonen zuschreiben, da sie das Realexperiment bereits kennengelernt haben.

Bezüglich des Themas Mach-Zehnder-Interferometer in schulischen Zusammenhängen muss man an dieser Stelle noch einen Punkt in Betracht ziehen, und zwar folgenden: In der Fachdidaktik Physik ist oft die Rede davon, dass die Betrachtung von Themen der Quantenphysik im Unterricht fachliches Hintergrundwissen von Lehrern erfordert, zu dem es bis jetzt wenig einheitliche Auffassungen gibt. Die Analyse der fachdidaktischen Literatur fördert einen Mangel an Materialien, in denen die Funktionsweise des Mach-Zehnder-Interferometers aus einer für die Schule geeigneten Perspektive betrachtet wird, zu Tage. Für eine Einbeziehung des Mach-Zehnder-Interferometers in den Quantenphysik-Unterricht werden allerdings – unter anderen Bedingungen – didaktische Materialien erforderlich, die den Lehrer bei der Vorbereitung des Unterrichts unterstützen können. Die detaillierte und vielfältige Beschreibung der Funktionsweise des Mach-Zehnder-Interferometers sowie die Literaturhinweise über dieses Thema, die im Kapitel 3 dieser Arbeit zur Verfügung gestellt wurden, sollen auch einen Beitrag zur konzeptuellen und experimentellen Vorbereitung des Unterrichts leisten.

## 5.3 Das konzeptuelle Profil

### Erhebung

Die Entwicklung von Untersuchungsinstrumenten zur Erhebung und zur Systematisierung der Schülervorstellungen ist von zentraler Bedeutung für die Forschung über das Lehren und Lernen der Quantenphysik in der Sekundarstufe. Insbesondere in der Phase der Einführung in die Quantenphysik sind Untersuchungen der Vorstellungen der Schüler notwendig, um die Entstehung von epistemologischen Hindernissen, die das Lernen der Quantenphysik erschweren können, zu vermeiden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben wir uns unter anderem mit Überlegungen zur Entwicklung eines Untersuchungsinstrumentes zur Erhebung und zur Darstellung des konzeptuellen Profils der Schüler über Photonen in der Phase der Einführung in die Quantenphysik befasst. Die daraus entstandenen Konstrukte – die Idee des konzeptuellen Profils und die Fragebogen – erfolgten in einer Auseinandersetzung mit den folgenden didaktischen Anforderungen:

- Ein allgemeingültiges theoriegeleitetes **Kategoriensystem** war zu entwickeln, das aus einer begrenzten Anzahl von Untersuchungskategorien besteht und mit dessen Hilfe die Schülervorstellungen über das Verhalten von Teilchen, Wellen und Photonen aus einer phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Perspektive erhoben und klassifiziert werden können.
- Aufgabenstellungen in den **Fragebogen** waren zu entwerfen, in denen Denkaufgaben in elementarisierter Befragungsform gestellt werden, die die mathematischen Anforderungen, die das schulübliche Maß in der einführenden Phase zur Quantenphysik übersteigen, vermeiden.
- Ein Modell für die Analyse des Schülerverhaltens war zu verwirklichen – **die Darstellung eines konzeptuellen Profils** –, in dem die Schülervorstellungen über das Verhalten von Photonen bezüglich ihrer Vorstellungen über das Teilchenbild und das Wellenbild ausgewertet und interpretiert werden können.

Die vorliegende explorative Studie ist nun ein Versuch, die Schüleraussagen über das Verhalten von Teilchen, Wellen und Photonen in einem für die drei erwähnten thematischen Felder gleichermaßen gültigen konzeptuellen Bezugssystem zu betrachten. Aus dieser Perspektive gesehen, lässt sich das Konstrukt “konzeptuelles Profil” generell als ein didaktisches Werkzeug verstehen, mit dessen Hilfe die Schülervorstellungen über einen bestimmten Begriff anhand eines entsprechenden Bezugssystems interpretiert werden können. Der Entwurf des konzeptuellen Profils Bachelards über den Begriff Masse im Hinblick auf die Begriffe Energie und Geschwindigkeit kann als ein Beispiel für künftige Verwendungen des Konstruktes “konzeptuelles Profil” als ein didaktisches Untersuchungsinstrument angesehen werden.

### Ergebnisse

Nach der Auswertung der Fragebogen konnte davon ausgegangen werden, dass einige Umstrukturierungen in den Schülervorstellungen aufgrund des Unterrichts zu beobachten sind. Die generellen Tendenzen lassen sich in den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Die Schüler zeigen bereits im Vortest angemessene Vorstellungen über das Teilchenbild und das Wellenbild.
- Es sind keine großen Veränderungen in den Schülervorstellungen über das Teilchenbild bzw. das Wellenbild aufgrund des Unterrichts festzustellen.
- Die Schüler unterscheiden bereits im Vortest das Verhalten von Photonen vom Verhalten von Teilchen bzw. von Wellen, zumindest bezüglich der Aspekte, die im Fragebogen erfasst werden.
- Nach dem Unterricht ist ebenfalls eine Differenzierung zwischen dem Verhalten von Photonen einerseits und dem Verhalten von Teilchen und Wellen andererseits zu beobachten. Allerdings haben sich einige Argumente zur Kennzeichnung dieser Unterschiede verändert.

Die Beobachtungen lassen sich so deuten, dass die Schüler Photonen nicht in erster Linie mit dem Teilchenbild oder mit dem Wellenbild assoziieren. Möglicherweise haben die Schüler erkannt, dass Teilchenbild und Wellenbild zur Beschreibung des Verhaltens von Photonen nicht geeignet sind. Dies ist aus der Sicht der Unterrichtskonzeption generell positiv zu interpretieren.

Die in der vorliegenden explorativen Studie enthaltenen Ergebnisse geben erste Hinweise auf den Rahmen einer didaktischen sinnvollen Betrachtung der Quantenphysik in der Sekundarstufe aus einer epistemologischen Perspektive. Vor allem aber sind die Ergebnisse dieser Untersuchung als Anregungen für weitere didaktische Überlegungen in diesem Zusammenhang anzusehen. Sowohl die Bearbeitung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Fragebogen als auch die Konstruktion weiterer Untersuchungsinstrumente, die insbesondere die ontologischen bzw. die epistemologischen Aspekte der Schülervorstellungen über die Quantenwelt näher erforschen, sind weiterhin erforderlich. Diese explorative Studie hat allerdings darauf hingewiesen, dass die Betrachtung der Schülerdenkweisen aus der Perspektive einer begrifflich-logischen Dimension einen wesentlichen Punkt für die Erforschung der Schülervorstellungen über die Quantenwelt darstellt. In den gedanklichen Verbindungen der Schüler zwischen den Begriffen Photonen und Teilchen bzw. Photonen und Wellen sind offensichtlich viele feine logisch-begriffliche Assoziationen verborgen, die sich nur innerhalb eines komplexen konzeptuellen Bezugssystems entziffern lassen. Gerade diese Nuance in den Schülervorstellungen sind schwer zu erfassen und lassen sich nicht einfach interpretieren. Daher ist die Forschung zur Entwicklung und zur Erprobung weiterer Instrumente wie beispielsweise

Kategoriensysteme, Fragebogen und konzeptueller Räume, mit deren Hilfe die Schülervorstellungen erhoben und interpretiert werden können, ein perspektivenreiches Feld.

### **Abschließende Bemerkung**

Die Unanschaulichkeit, die mathematischen Anforderungen und die für die Durchführung im Unterricht anspruchsvollen Experimente machen die Einbeziehung der Quantenphysik in schulische Kontexte, sei es aus der Sicht der Fachdidaktik Physik oder aus der Sicht der Unterrichtspraxis, zu einer großen, aber auch motivierenden Herausforderung.

Wenn dann gefordert wird, wissenschaftstheoretische Überlegungen im Quantenphysik-Unterricht zu berücksichtigen, wird diese Herausforderung noch größer. Mit dieser Forderung wird von Physikdidaktikern bzw. Physiklehrern erwartet, sich nicht nur mit Überlegungen zur Elementarisierung der Quantenphysik für die Sekundarstufe auf zumutbarem kognitiven Niveau, sondern auch mit der Kontroverse über die ontologischen bzw. epistemologischen Fragen der Quantentheorie auseinanderzusetzen. Daher entsteht für sie der Auftragszustand, eine “philosophische Entscheidung” zu treffen.

In der Fachdidaktik Physik wird oft behauptet, dass die Betrachtung offener Fragen der Quantenphysik und der Interpretationsproblematik der Quantentheorie nicht nur didaktisch ungünstig ist, sondern auch – was die Schüler betrifft – Frustrationen verursachen kann. Manche solcher Enttäuschungen entstehen möglicherweise bereits im Kern einiger didaktischer Konzeptionen, die wir im Rahmen dieser Arbeit metaphorischerweise nach dem Prinzip der “Bankiers-Erziehung” von Paulo Freire gekennzeichnet haben. Wenn die Physikdidaktiker bzw. die Physiklehrer dieses berücksichtigen, können wahrscheinlich eigene innere Widersprüche überwunden und somit falsche Erwartungen verhindert werden. Die vorliegende didaktische Überlegung ist ein Versuch, einen Schritt in diese Richtung zu machen.